4
TRABALHO EXPERIMENTAL

O primeiro grande desafio no desenvolvimento de pigs instrumentados é a necessidade de se projetar um sistema autônomo, compacto, altamente resistente e confiável. O ambiente de operação do pig, o interior de um duto, é muito hostil, apresentando pressões e temperaturas elevadas. O comportamento do pig durante seu deslocamento pelo interior do duto é bem complexo envolvendo fortes impactos, vibrações mecânicas, variações bruscas de velocidade e a realização de diferentes tipos de curvas.

Desta forma, o pig instrumentado deve envolver as mais modernas e compactas tecnologias eletrônicas associadas a mecanismos de alta resistência e robustez mecânica, se tornando uma ferramenta eficiente e confiável.

4.1.
OLEODUTO

4.1.1.
TESTE DA ELETRÔNICA E SENSORES EM LABORATÓRIO

O projeto de desenvolvimento de tecnologia nacional em eletrônica embarcada para pigs instrumentados foi realizado pela parceria do Centro de pesquisas da Petrobras (Cenpes) e o Centro de Estudo em Telecomunicações da PUC-Rio (CETUC). Hoje essa tecnologia é comprovadamente eficiente e constantemente utilizada em inspeções com pigs magnéticos e geométricos.

Diferentes eletrônicas foram desenvolvidas, umas mais compactas e com menos recursos e outras maiores e mais poderosas. Para a implementação do pig detector de vazamentos, escolhemos a eletrônica chamada de TDS2020 (www.triangledigital.com), que é simples, compacta e apresenta os recursos necessários para o nosso projeto.

Principais características da eletrônica TDS:

- Aquisição em 8 canais.
- Conversão A/D em 10 bits na faixa de 0,0 – 5,0v.
- Frequência de aquisição de 333 Hz.
- Memória Flash de 1,0 Gigabyte.

Com eletrônica de aquisição definida, partimos para a definição dos sensores de pressão. Os sensores escolhidos foram os da série NPI-19 da Lucas Novasensor (www.novasensor.com) que apresentam as seguintes características:

- sensor piezo-resistivo fixado em membrana.
- alimentação de 5v.
- faixa de operação 0 a 250 psi.
- saída linear de 0 a 200mV (pressão atmosférica = 0mV; 250psi = 100mV).

Como a pressão de operação nos oleodutos varia bastante dentro da faixa de 0 a 1000 psi, é necessário adaptar o nível do sinal de saída do sensor através de uma placa amplificadora.

Já planejando testar o pig em um duto de testes no Dutos e Terminais do Sudeste (DTSE), projetamos a eletrônica para operar sob as condições de operação deste duto. A pressão máxima deste duto de teste é de 100 psi. Assim, o sinal do sensor precisa ser amplificado de modo a termos uma saída máxima quando a pressão for 100psi.

O conversor analógico-digital da eletrônica de aquisição de dados apresenta excursão de entrada de 0 a 5v. Portanto o ganho da placa amplificadora deve ser tal que a saída seja de 5v quando os sensores indicarem 100 psi.

Os sensores foram conectados a um sistema hidráulico com pressão variável (figura 8) para levantarmos as suas curvas de calibração.

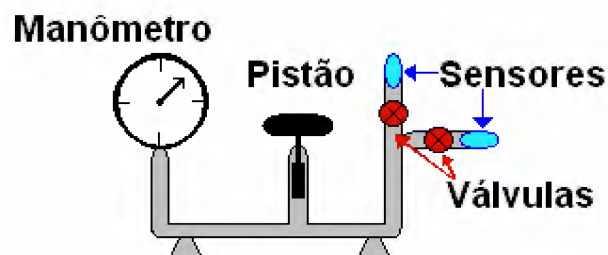



Figura 8 – Esquema do sistema hidráulico com pressão variável.

Figura 9 – Sistema hidráulico com pressão variável.

Em laboratório os sensores apresentaram as seguintes curvas de calibração:

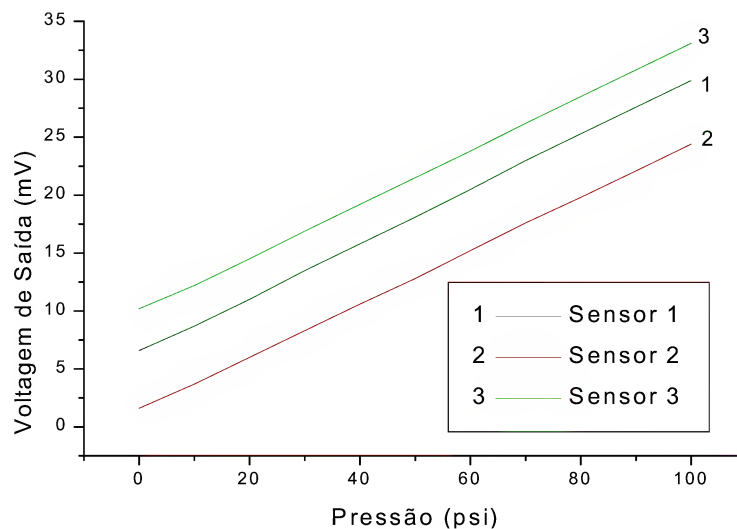



Figura 10 – Curvas de calibração dos sensores de pressão.

O gráfico demonstra que os sensores têm um comportamento linear com o mesmo coeficiente angular, porém diferentes coeficientes lineares. Esta diferença será depois corrigida matematicamente pelo software de análise de dados.

Para o cálculo do ganho adotamos o maior valor apresentado para a pressão de 100 psi, o do sensor 3, de 33,1 mV, deste modo temos:

Ganho = sinal de saída / sinal de entrada

G = 5000 / 33,1 => G = 151

O amplificador de instrumentação utilizado na placa amplificadora foi o INA122 , cujo ganho é calculado através da seguinte expressão:

G = 5 + (200k / Rg) ; onde Rg é a resistência de ganho

Rg = 1,36 kΩ ;

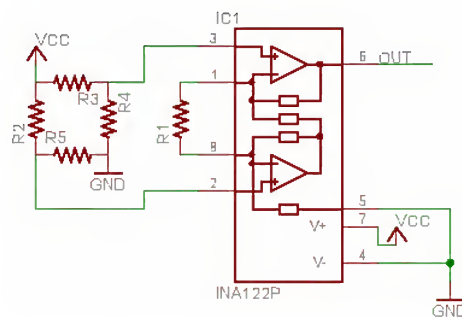



Figura 11 – Esquema do circuito amplificador.

Utilizamos Rg =1,6 kΩ que produz um ganho igual a 130. Então, quando a pressão for igual a 100 psi, teremos um sinal de saída igual a 4,3V.

Placa de Tratamento de Sinais:

A placa de tratamento de sinais recebe os sinais das 3 placas amplificadoras, o sinal do hodômetro e as diversas tensões de alimentação da placa reguladora de tensões. O hodômetro gera um sinal analógico (senoidal), que é convertido em sinal digital (onda quadrada) através de um circuito comparador e enviado para a eletrônica de aquisição de dados. Cada volta do hodômetro gera dois pulsos digitais que são contados pela eletrônica. Os sinais dos 3 sensores são enviados para a eletrônica de aquisição de dados.

O teste final da eletrônica foi o de aquisitar o sinal dos sensores para pequenas variações de pressão entre eles. Na unidade de teste hidráulica, cada sensor podia ser isolado hidraulicamente dos demais através do fechamento de

válvulas. O procedimento adotado foi o de isolar um sensor e variar a pressão nos demais. Os gráficos apresentados na figura 12 mostram os dados adquiridos pelos três sensores para variações de pressão de 2 psi.

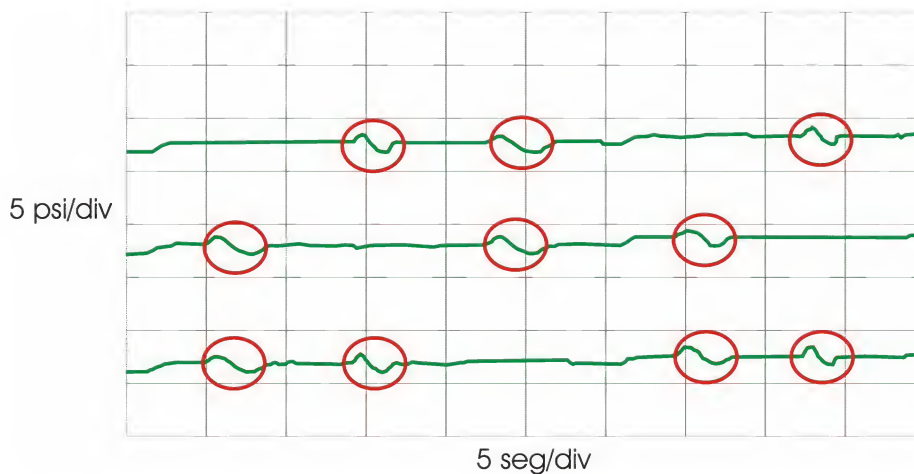



Figura 12 – Sinais aquisitados para variações de 2 psi.

Os testes de laboratório mostraram resultados satisfatórios. Uma diferença de 2 psi entre os sensores gerou uma variação de sinal bem visível e com baixo nível de ruído.

4.1.2. TESTE DO PRIMEIRO PROTÓTIPO

O Pig Detector de Vazamentos, projetado para operar em dutos de 14” de diâmetro, é composto por dois módulos interligados mecanicamente através de uma junta articulada. Os copos das extremidades são especiais com alto poder de vedação. A figura 13 apresenta uma visão geral do protótipo e a figura 14 os copos vedadores em detalhe. Estes copos apresentam “ranhuras” flexíveis em suas bordas, que maximizam a vedação, inclusive na passagem por soldas.

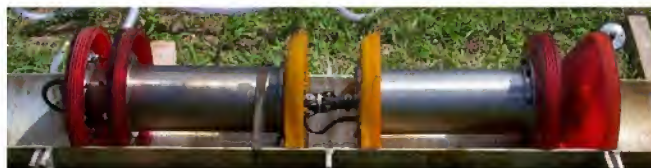



Figura 13 – Protótipo do Pig Detector de Vazamentos para Dutos de 14”.

Figura 14 – Copos Vedadores.

O teste foi realizado no duto de ϕ14” do loop de testes localizado nos Dutos e Terminais do Sudeste (DTSE). Conforme mostrado na figura 16, foi instalado um dreno de ϕ 1”, com válvula de bloqueio tipo esfera, localizado a 32m a partir da curva do início do trecho reto.

Figura 15 – Loop de testes para pigs do DTSE.

Figura 16 – Dreno instalado para simulação do vazamento.

Nesse dreno foi conectada uma mangueira para conduzir o vazamento até o local de coleta de drenagem.

Na extremidade da mangueira, foram instalados tampões removíveis com furos de diâmetro 6, 3, 1 mm que correspondem, respectivamente, às vazões de 2, 0,5 e 0,1 m^3/h , na pressão do loop de 26psi.

Em cada corrida do pig, o dreno era aberto no momento em que o pig chegava no início do trecho reto, e mantido nessa condição até a chegada no final desse trecho. Durante a corrida o volume do líquido vazado era coletado em um tambor para a medição e cálculo da vazão, vide figura 17.

Figura 17 – Líquido sendo coletado para medição de vazão.

Figura 18 – Vazamento com furo de 1mm de diâmetro.

Os gráficos a seguir apresentam os dados aquisitados no momento em que o pig passou pelos diferentes vazamentos.

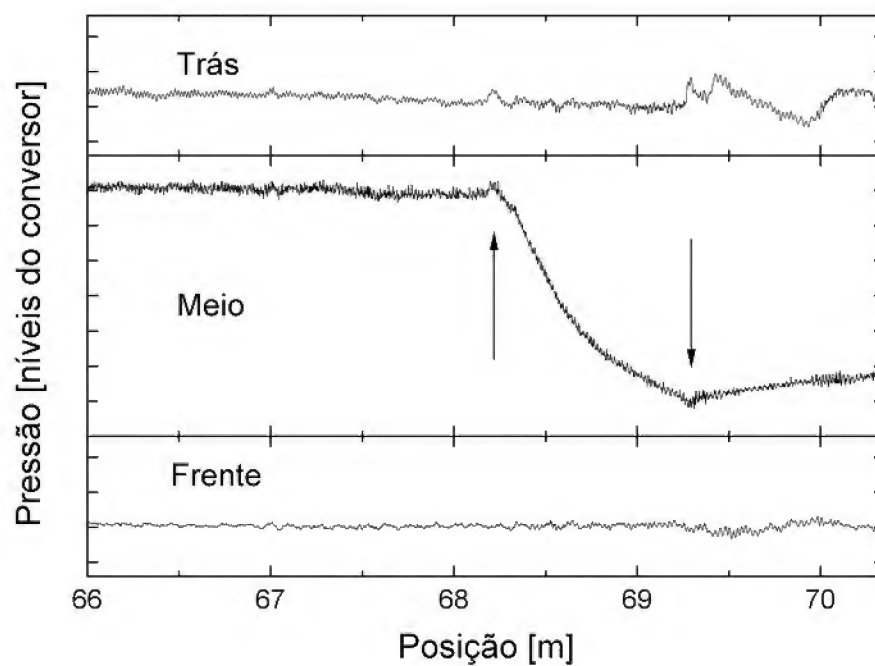



Figura 19 – Níveis de pressão para o vazamento de 6mm.

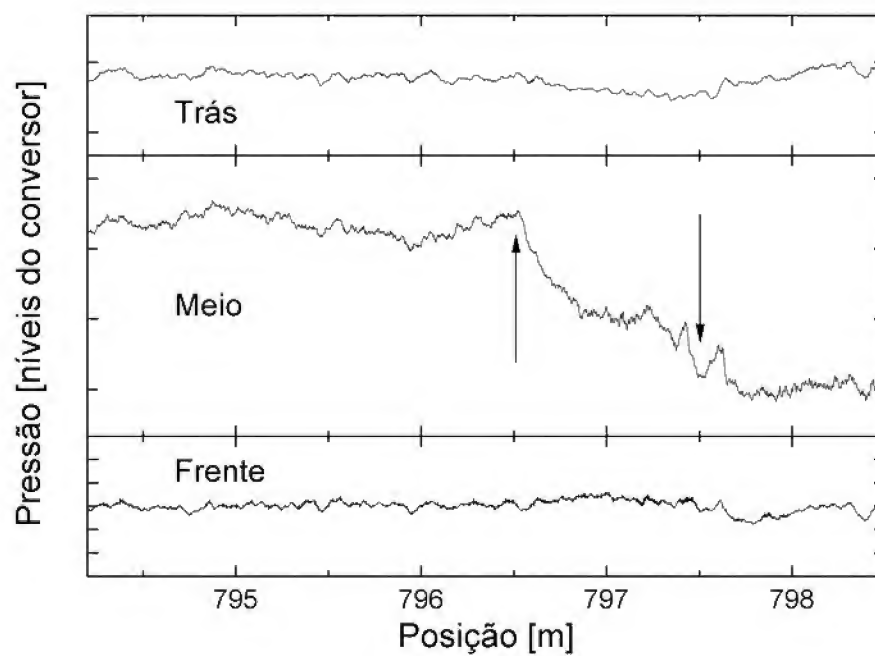



Figura 20 – Níveis de pressão para o vazamento de 3mm.

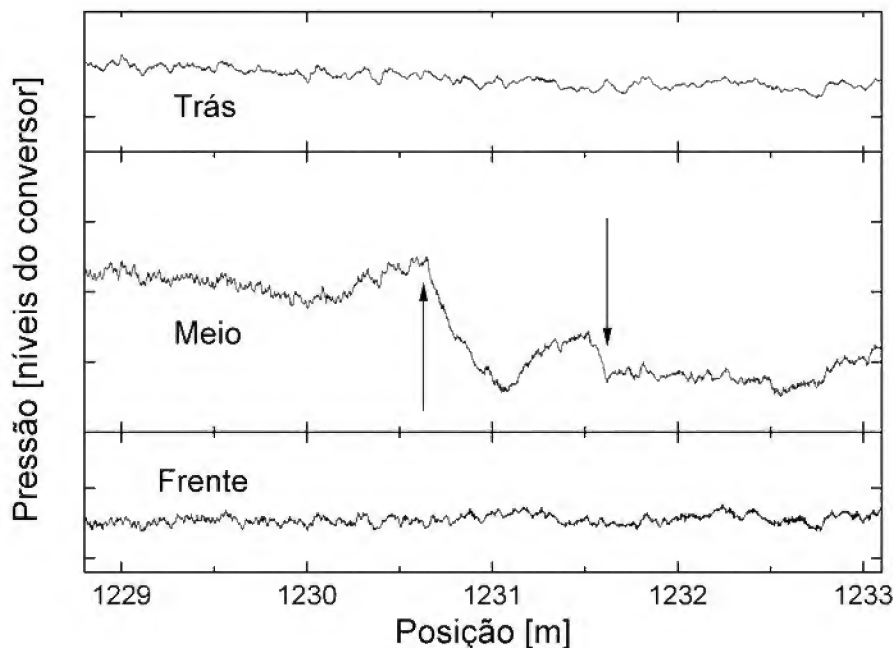



Figura 21 – Níveis de pressão para o vazamento de 1mm.

Os gráficos apresentam os sinais aquisitados pelos sensores em função da posição do pig e estão de acordo com o esperado. As escalas foram escolhidas de forma a otimizar a visualização de cada sinal.

Quanto maior o vazamento melhor é a relação sinal ruído. Nos três casos notamos que no momento em que os copos da frente do pig encontram o vazamento (primeira seta), se inicia uma queda significativa na pressão do volume de teste (pressão no meio). A segunda seta indica a posição em que o pig ultrapassa o vazamento e se inicia o lento restabelecimento da pressão do volume de teste. No caso do menor orifício, o de 1mm, este restabelecimento começa com o pig ainda em presença do vazamento. A distância entre as setas corresponde ao comprimento do volume de teste, neste caso 1 metro.

A queda de pressão é bem nítida em todos os casos e nos permite afirmar que existe um vazamento nestes pontos do duto. Também observamos que os sinais das pressões à frente e atrás sofrem perturbações depois que o pig deixa o vazamento para trás, isso é mais visível no caso do orifício de 6mm.

A figura 22 apresenta os dados para um trecho de 20 metros de duto.

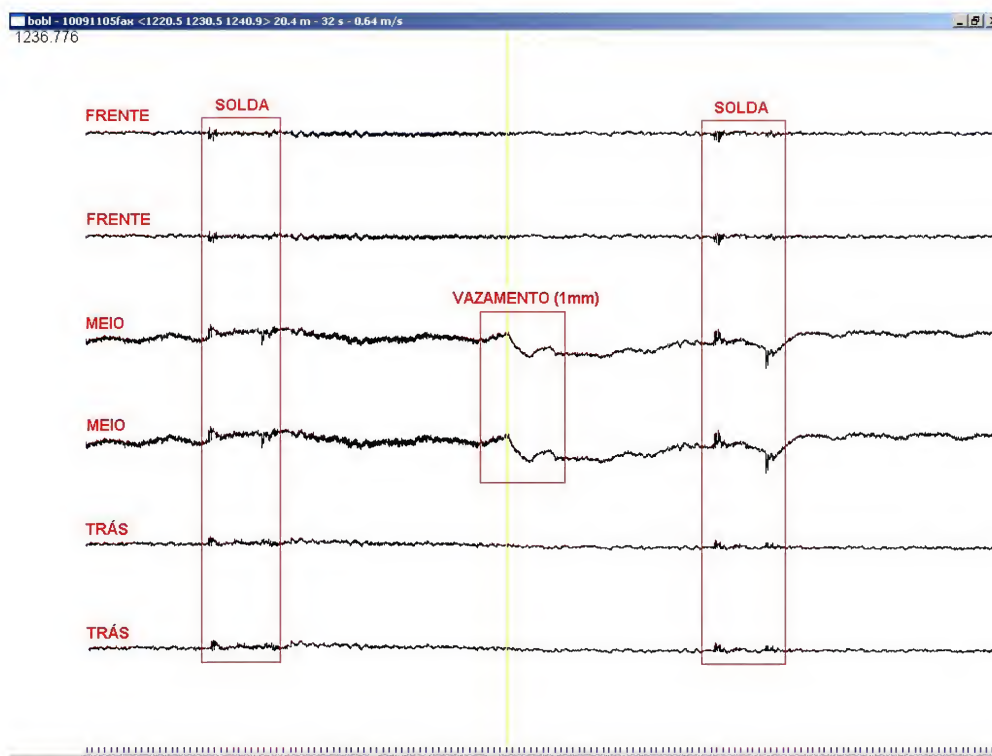



Figura 22 – Variação das pressões em 20m de duto e os sinais das soldas.

Nesse trecho, além do sinal do vazamento aparecem variações de pressão devido à passagem do pig pelas soldas do duto. As causas destes sinais estão relacionadas com o impacto do pig nas soldas, pela compressão dos copos e pela possível perda de vedação geando influxo de produto no volume de teste.

Estas perturbações são bem interpretadas durante a análise dos dados para não se confundirem com vazamentos. Algumas características típicas são utilizadas, por exemplo: as soldas sensibilizam os seis sensores ao mesmo tempo e ocorrem de 12 em 12 metros (no caso do loop de testes).

4.2. GASODUTOS

4.2.1. MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL

O objetivo do aparato experimental é nos permitir os primeiros testes em laboratório simulando pequenos vazamentos de gás altamente pressurizado. Nosso objetivo é levantar as características acústicas dos vazamentos e relacioná-las com as variáveis de pressão interna do duto, vazão e diâmetro do

furo. Para simular as condições de pressão de um gasoduto em laboratório de forma simples e segura o seguinte aparato experimental foi projetado.

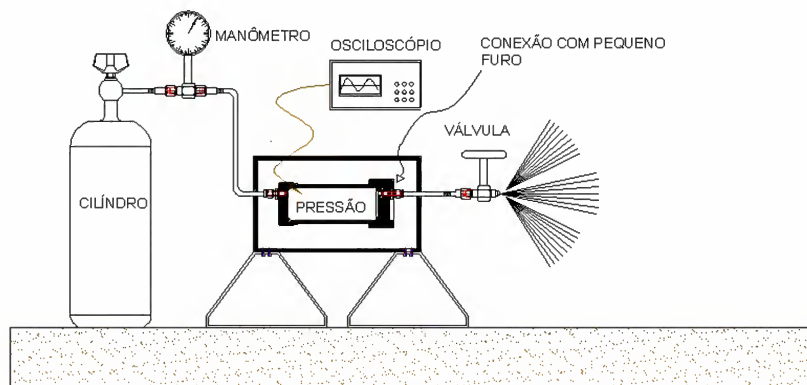



Figura 23 – Esquema do aparato experimental para simulação de vazamentos.

A seguinte lista de material foi utilizada:

- Cilíndro de Nitrogênio comprimido a 3000 psi.
- Válvula Reguladora de pressão.
- Vaso de pressão (pressão interna de 2000 psi).
- Válvula Esfera de abertura rápida.
- Tubing de Pressão.
- “Gaiola” de proteção.
- Osciloscópio.

O vaso de pressão simula o duto e deve ser projetado para suportar as mesmas pressões utilizadas em gasodutos. Na tampa do vaso instalamos conexões com pequenos furos que serão responsáveis pelo vazamento. Na saída destas conexões, conectamos um *tubing* com uma válvula de abertura rápida em sua extremidade. Desta maneira o vazamento só tem início quando abrimos a válvula.

O vaso é pressurizado através de um cilindro de gás nitrogênio. O nitrogênio foi escolhido por não ser combustível e nem tóxico. A pressão interna do vaso é controlada pela válvula reguladora do cilindro e monitorada pelo manômetro.

Por razões de segurança, cobrimos o vaso com uma resistente gaiola de proteção, para evitar riscos de acidentes com alguma peça que pudesse se desprender durante o processo de pressurização e simulação de vazamentos.

No interior do vaso instalamos os microfones e um transdutor elétrico de pressão. Os sinais de variações de pressão e de som são analisados por um osciloscópio digital de bancada.

Com este aparato podemos simular vazamentos de diferentes diâmetros, com diferentes pressões e testar diversos tipos de microfones.

O vaso de pressão utilizado foi originalmente projetado para operar com pressões externas, para nossa experiência o adaptamos para ser utilizado com pressão interna. Instalamos tirantes externos radiais de forma a fixar a tampa contra forças internas. A pressão utilizada nos teste é de 1000 psi.

O nitrogênio é um gás não inflamável que se operado corretamente, não fornece nenhum risco. Antes da pressurização para o teste, o vaso passou por um teste hidrostático com pressão de 1500 psi, 50% maior do que a utilizada na experiência, e não apresentou problemas sendo aprovado para o uso.

O número de tirantes, sua espessura e seu tipo de material foram calculados considerando pressão interna de 3000 psi.

Figura 24 – Foto do vaso adaptado para operar com pressão interna de 1000 psi.

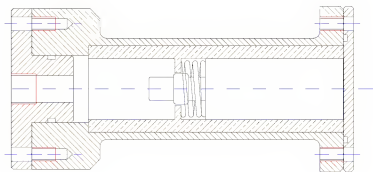
As figuras a seguir apresentam o sistema montado, o vaso com a válvula instalada, está encoberto pela gaiola de proteção na figura 25. Já na figura 26 observamos os cilindros de nitrogênio, a válvula reguladora e os manômetros instalados.

Figuras 25 e 26 – Gaiola de proteção e cilindros de nitrogênio.

4.2.2. TESTES COM SENSORES DE EMISSÃO ACÚSTICA

Durante os experimentos iremos avaliar o desempenho de diferentes tipos de sensores acústicos. Serão avaliadas a amplitude do sinal, a resposta em freqüência, a relação sinal ruído e a resistência a alta pressão.

Primeiro testamos sensores de emissão acústica, que são muito utilizados para detecção de vazamentos, eles operam pelo lado externo do duto acoplados à sua parede. As ondas sonoras que eles detectam são aquelas que se propagam pela parede do duto e não pelo gás ou óleo. Ou seja, seu acoplamento é ideal com meios sólidos e rígidos. Além disso, ele não é projetado para operar sob as altas pressões internas de um gasoduto.

Para utilizarmos estes sensores no interior do duto, precisamos de um encapsulamento para protegê-lo da pressão do duto. O seguinte encapsulamento foi projetado:

Figuras 27 e 28 – Desenho e foto do encapsulamento do sensor.

O sensor é instalado em contato com o flange frontal do encapsulamento. O som do vazamento deve vibrar este flange e assim ser transmitido para o sensor.

A fixação do encapsulamento dentro do vaso de pressão é feita através de um suporte com discos de poliuretano. O poliuretano minimiza a transferência de vibração pelas paredes do vaso.

Figuras 29 e 30 – Desenho e foto dos discos de suporte em poliuretano.

Figura 31 – Encapsulamento instalado dentro do vaso de pressão.

Os testes realizados com os sensores de emissão acústica não apresentaram bons resultados. Apesar de serem muito sensíveis a emissões acústicas propagadas em sólidos, o acoplamento deles com o gás gera muita atenuação e os inviabiliza para nossa aplicação. A onda sonora propagada no gás ao encontrar um meio rígido pela frente é quase que totalmente refletida devido às grandes diferenças das impedâncias acústicas dos dois materiais.

A solução encontrada foi a de projetarmos nosso próprio sensor utilizando materiais piezoelétricos. O capítulo a seguir apresenta as etapas de seu desenvolvimento.

4.2.3.
DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTOR ULTRA-SÔNICO

Devido à dificuldade de se encontrar no mercado um microfone para gases, resistente a alta pressão, que responda em larga faixa de freqüência e possível de ser utilizado na aplicação de pigs instrumentados, iniciamos o desenvolvimento dos nossos próprios transdutores (microfones).

Alto-falantes e microfones são transdutores que relacionam sinais elétricos com as vibrações sonoras. Os convencionais são compostos por uma superfície que vibra, chamada de diafragma, conectada a geradores de sinais, como indutores e cerâmicas piezoelétricas.

A resposta em freqüência do microfone e sua sensibilidade dependem das propriedades mecânicas do diafragma como impedância acústica, diâmetro e espessura. Quanto menor o diâmetro, maiores são as freqüências de resposta, porém, menor também é a amplitude do sinal. As dimensões ideais da

membrana são aquelas que mantêm uma boa relação sinal ruído na faixa de freqüência desejada.

Quando a onda sonora encontra uma mudança de meio de propagação com grande variação de impedância acústica, ela é muito refletida e não é bem transmitida. Assim, a impedância acústica da membrana do microfone deve ser a mais próxima possível da do gás. Durante a pesquisa testamos diferentes tipos de transdutores.

4.2.3.1. MEMBRANA DE AÇO

Como primeiro experimento, na tentativa de obtermos um transdutor bem simples e de fácil montagem, projetamos uma membrana de aço com a menor espessura possível capaz de resistir à pressão externa de 1000psi e vibrar na faixa de freqüência desejada. Esta membrana funciona como o diafragma, vibrando com a incidência das ondas sonoras. Pelo seu lado interno, colamos um filme de polímero piezoelétrico *polyvinylidene fluoride* (PVDF), muito sensível a vibrações mecânicas. Devido às dimensões do filme, a membrana foi fabricada na forma circular com raio de 12 mm e espessura de 0.82 mm.

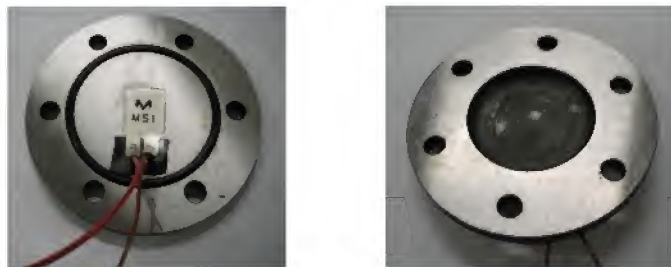



Figura 32 - Foto da membrana com o elemento sensor colado.

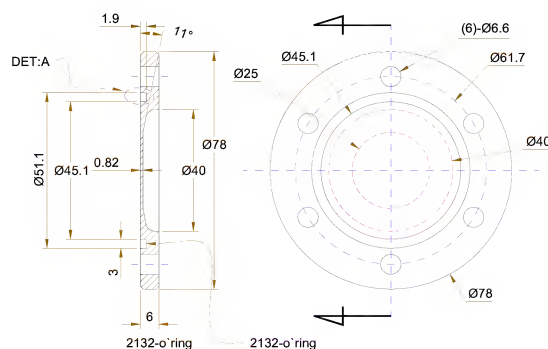



Figura 33 – Desenho de fabricação da membrana.

O disco foi montado no encapsulamento e instalado dentro do vaso para o teste. O resultado não foi bom, o som do vazamento não teve intensidade suficiente para gerar uma boa relação sinal ruído. A membrana apesar de ser fina, não vibrou de forma significativa e a grande diferença de impedância acústica entre o aço e o gás gerou muita reflexão e pouca transmissão.

Os resultados ruins dos testes nos mostraram que só poderíamos obter um bom sinal com uma membrana bem fina e de material com bom acoplamento a gases. Além disso, temos que igualar a pressão absoluta dos dois lados da membrana para que ela não sofra esforços. Com base nestas conclusões, iniciamos novos experimentos, agora com o método de equalização da pressão. Dois projetos foram desenvolvidos, ambos utilizando o princípio de membrana associada a materiais piezoelétricos.

4.2.3.2.
DISCO PIEZOELÉTRICO

A partir deste segundo projeto, passamos a aplicar o método de equalização da pressão dos dois lados da membrana. Desta forma podemos diminuir a espessura da membrana e obter maiores deformações e conseqüentes maiores sinais elétricos.

Neste microfone, utilizamos como membrana um disco de latão com depósito de material piezoelétrico em uma de suas faces. O disco tem espessura de 0.4 mm e diâmetro de 15 mm. A vibração do disco é traduzida por sinais elétricos pelo piezo depositado. As figuras 34 e 35 apresentam o encapsulamento de alumínio projetado para fixar o disco e o conector elétrico. Furos laterais permitem a equalização da pressão dos dois lados do disco.

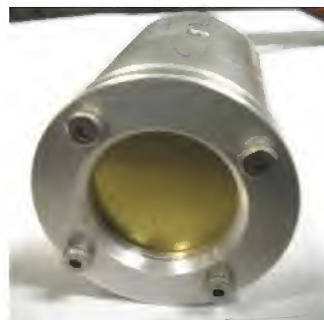



Figura 34 e 35 – Visões do microfone com disco piezoelétrico montado.

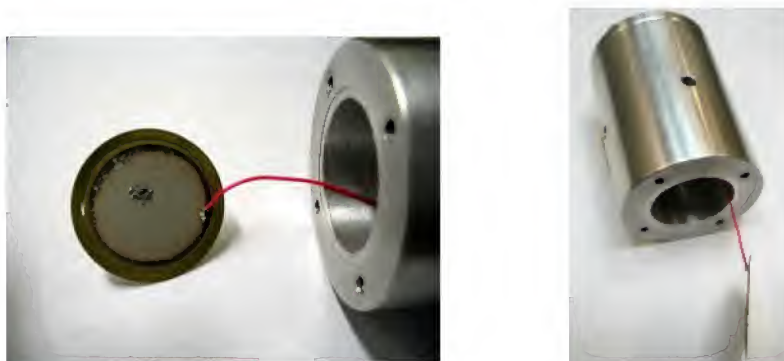



Figura 36 e 37 – Microfone piezoelétrico desmontado.

O lado interno da membrana apesar de estar bem isolado acusticamente do lado externo pelo cilíndro de alumínio, ainda assim está vulnerável a sons que passem pelos furos de equalização. A incidência destes sons pode atenuar a vibração do disco pelo efeito de sobreposição das ondas sonoras internas e externas. Para minimizarmos este efeito, preenchemos o interior do microfone com espuma, formando um atenuador para os sons em alta frequência pelo lado interno da membrana. Desta forma, equalizamos a pressão absoluta, porém mantemos o diferencial de pressão provocado pelo som.

4.2.3.3.
FILME DE PVDF COMO MEMBRANA

No segundo projeto de microfone, o elemento transdutor utilizado foi o filme de polímero piezoelétrico *polyvinylidene fluoride* (PVDF). O PVDF é indicado para a nossa aplicação devido a ele apresentar as seguintes características:

- Bom acoplamento com gases.
- Ampla faixa de resposta em frequência
- Baixo custo.
- Alta sensibilidade.
- Capacidade para operar sob altas pressões, em torno de 1000 psi.

Utilizamos uma sugestão de aplicação para alto-falantes publicada pelo fabricante de filmes de PVDF, para projetarmos o microfone [19]. Assim como sinais elétricos no PVDF geram vibrações mecânicas, a recíproca é verdadeira, ou seja, vibrações mecânicas geram sinais elétricos. Apesar das respostas não

serem idênticas, o princípio é o mesmo. Deste forma, vamos chamar o alto-falante de transdutor, já que ele também pode ser utilizado como microfone.

No caso de transdutores de polímeros piezoelétricos, o gerador de sinais e o diafragma são combinados em um único elemento. Utilizando o efeito piezoelétrico do material PVDF e a flexibilidade do filme polímero, um transdutor pode ser feito com PVDF gerando ondas sonoras sob o estímulo de sinais elétricos.

A estrutura é bem simples, e consiste na fixação do filme de PVDF sobre uma estrutura rígida. Controlando as dimensões e a forma desta estrutura, podemos modificar as suas propriedades acústicas. A figura abaixo apresenta o esquema de montagem:

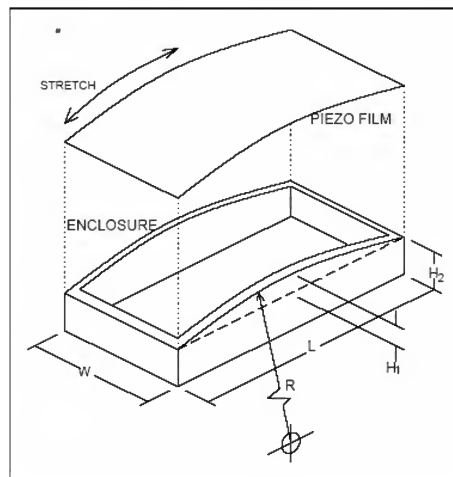



Figura 38 – Esquema de montagem do transdutor.

Observando a figura identificamos duas partes. A primeira é o diafragma de PVDF que irá vibrar, a segunda é o suporte, cuja função é isolar os lados interno e externo do filme. O filme é curvado em uma direção e fixado rigidamente nas bordas do suporte. As ondas sonoras criam uma deformação mecânica tanto na direção normal ao filme quanto na direção de seu plano. Como o filme é muito fino, a deformação normal é insignificante, porém a na direção do plano é convertida em movimento radial ao longo do raio de curvatura e perpendicular à superfície do filme. Devido à curvatura, o filme basicamente se move para dentro e para fora do suporte. O projeto do transdutor tem ótima resposta em freqüência, sendo que acima de 20kHz ela é constante.

A seguir vamos discutir os principais parâmetros que influem no seu desempenho.

4.2.3.3.1. ESPESSURA DO FILME DE PVDF

O fabricante de filmes de PVDF fornece filmes em diferentes espessuras, as padrões são 28 µm, 52 µm e 110 µm. O nível de pressão sonoro (*sound pressure level* em inglês , SPL) gerado por um polímero de filme PVDF à uma certa distância é diretamente proporcional ao sinal elétrico aplicado. Então, para uma voltagem fixa, quanto menor a espessura do filme maior é a SPL gerada. O nível de pressão sonoro (SPL) é normalmente usado para medir a performance de um alto-falante e é definido pela seguinte equação:

$$SPL = 20 \log_{10} P/P_{ref} \text{ (dB)}$$

P é a pressão sonora a uma certa distância do alto-falante e $P_{ref} = 2 \times 10^{-5}$ Pascal. Reduzindo a espessura do filme pela metade aumentamos em 6dB a SPL. Entretanto, reduzindo a espessura aumentamos a capacitância do filme o que aumenta a corrente da fonte geradora do sinal elétrico. O uso de filmes mais finos pode também causar deformações na sua curvatura e irregularidades na curva de resposta em freqüência.

4.2.3.3.2. CURVATURA DO FILME DE POLÍMERO PIEZO-ELÉTRICO

O raio de curvatura do PVDF é um importante parâmetro para definirmos a sua resposta em freqüência. Para um cálculo simplificado, a baixa freqüência de corte do transdutor é proporcional à raiz quadrada da razão entre o módulo de Young do PVDF e sua densidade, e inversamente proporcional ao raio de curvatura. Substituindo as propriedades do material, esta baixa freqüência pode ser estimada pela seguinte equação:

$$F = 21 / R \text{ (kHz)}$$

R é o raio de curvatura em centímetros e F é a baixa freqüência de corte. A figura 39 apresenta a resposta em freqüência calculada pelo fabricante.

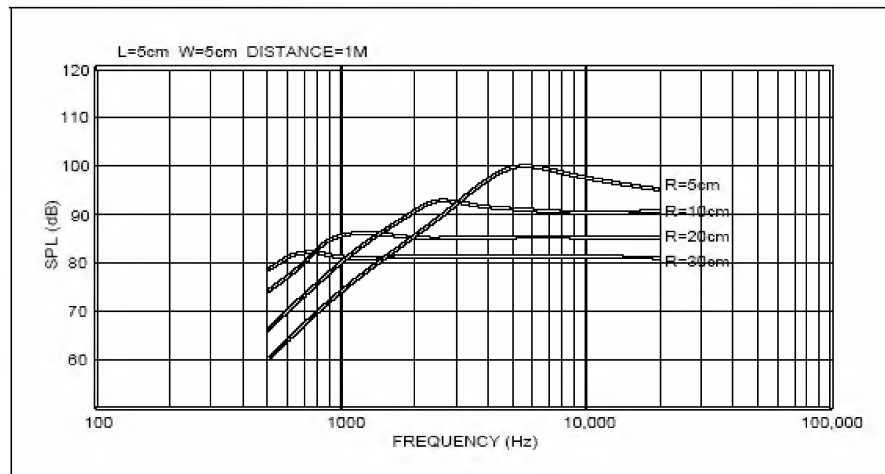



Figura 39 – Resposta em freqüência do microfone fornecida pelo fabricante de PVDF.

No projeto, a curvatura do filme precisa ser considerada junto com outros parâmetros da estrutura. Por exemplo, para transdutores com pequena área, principalmente com curtas larguras L, um raio maior faz a curvatura tender a um plano, resultando em menor saída elétrica. Por outro lado, para áreas maiores, pequenos raios resultam em microfones maiores.

A mudança do raio não só controla a freqüência de corte, mas também afeta a SPL a certas distâncias do transdutor. A figura 40 apresenta as relações entre o raio de curvatura com a freqüência de corte e com a SPL.

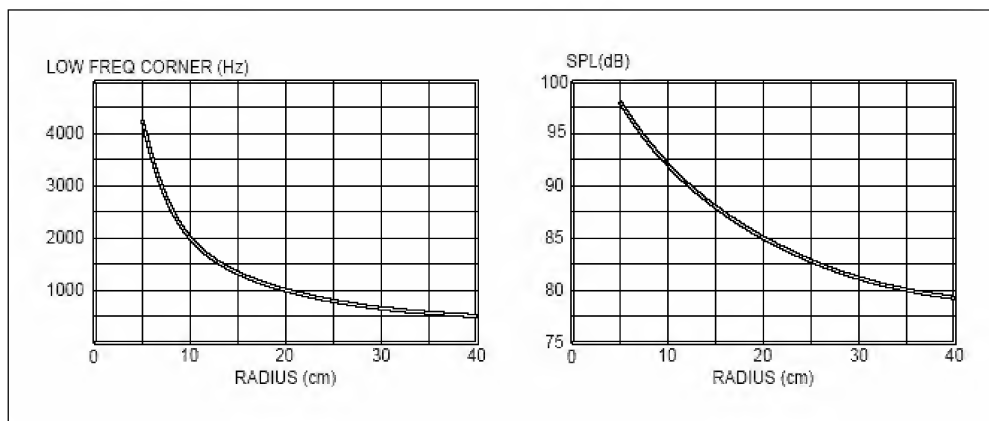



Figura 40 – Relação entre o raio de curvatura com a freqüência de corte e com a SPL.

Como podemos notar nos gráficos, tanto a freqüência de corte quanto a SPL são inversamente proporcionais ao raio.

4.2.3.3.3. COMPRIMENTO E LARGURA DO TRANSDUTOR DE PVDF

A saída acústica do transdutor de PVDF é diretamente relacionada com o comprimento e largura, que são determinadas para cada tipo de aplicação. A SPL gerada por um alto-falante a certa distância é linearmente proporcional à área ativa do PVDF. Assim, a SPL é uma função logarítmica das dimensões do filme PVDF de área retangular. A figura 41 apresenta a relação entre SPL com o comprimento e largura a 10kHz.

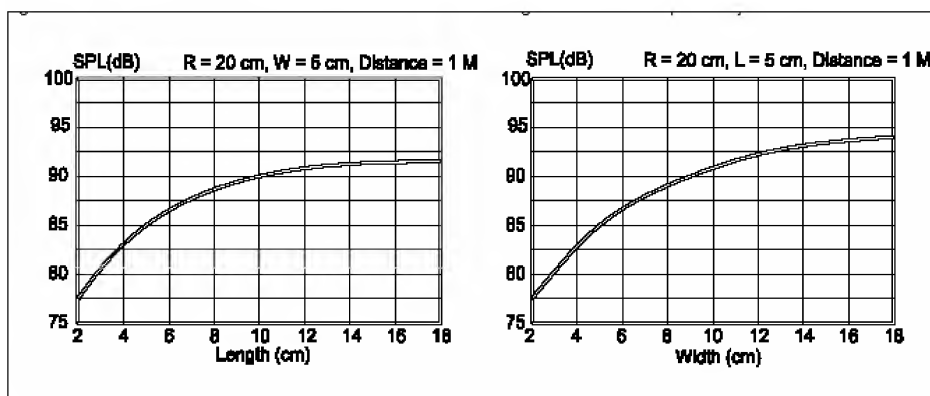



Figura 41 – Relação da SPL com o comprimento e largura do transdutor.

4.2.3.3.4. MONTAGEM DO TRANSDUTOR

Como os sons de pequenos vazamentos de gases altamente pressurizados são em altas freqüências, dezenas de kHz, projetamos o microfone de forma a ter maior sensibilidade nesta faixa.

O filme de PVDF é do tipo DT1-028K/L , figura 42, com filme de espessura de 28 µm, as dimensões do suporte são: L = 3,8 cm, W = 1,5 cm e R= 5,0 cm.

O suporte do transdutor, como mostrado na figura 43, foi furado na sua lateral para a equalização da pressão, e seu interior foi preenchido com espuma para absorção sonora criando maior diferencial acústico. A membrana de PVDF foi esticada e fixada com cola nas suas bordas como mostrado na figura 44.

Figuras 42 e 43 – Membrana de PVDF e Suporte do Transdutor.

Figura 44 – Microfone PVDF montado.

4.2.4. RESPOSTA EM FREQÜÊNCIA DOS MICROFONES

Após a montagem dos microfones, começamos os processos de teste em laboratório. O sinal elétrico de saída de um microfone ideal deveria apresentar exatamente as mesmas características de amplitude e freqüência que o som incidente em sua membrana.

Porém, sabemos que isto não acontece devido a diversos fatores de perda associados à transferência de energia do gás para o sólido. As dimensões da membrana estão diretamente ligadas com a resposta em freqüência assim como a sua inércia de massa, o comportamento piezoelétrico, o nível de reflexão sonora, a estrutura molecular etc.

Portanto, o sinal de saída não apresenta a mesma amplitude e nem o mesmo espectro em freqüência que o som original. Antes de realizarmos a análise de sons com microfones precisamos conhecer a fundo suas características de resposta, que formam a função de transferência do microfone. Conhecendo esta função, podemos interpretar corretamente o som original a partir do sinal aquisitado.

O sinal aquisitado é obtido pelo produto entre o sinal original (som) e a função de transferência do microfone. Então para restaurarmos o som original

devemos dividir o sinal aquisitado pela função transferência, esta relação é apresentada no fluxograma abaixo.

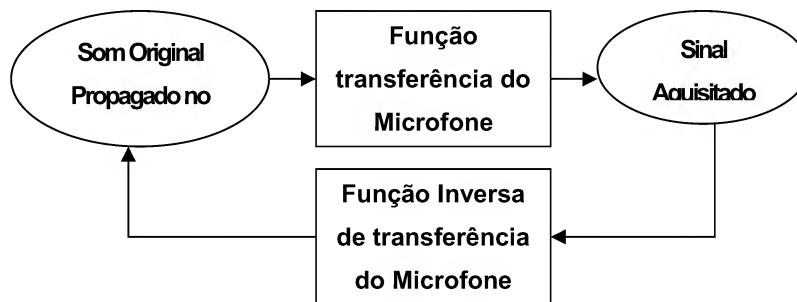



Figura 45 – A relação da função transferência do microfone com o sinal original.

A primeira caracterização de um microfone é o levantamento da sua curva de resposta em freqüência. O processo de levantamento consiste na análise do sinal de saída quando excitamos o microfone com um ruído branco conhecido. O ruído branco ideal apresenta o mesmo nível de energia em todas freqüências dentro de uma faixa determinada.

Tanto para a geração do ruído, quanto para a análise do sinal utilizamos um analisador de espectros. O analisador apresenta uma fonte capaz de gerar um ruído eletrônico ideal.

Na experiência de levantamento da curva dos sensores, conectamos um alto-falante na fonte do analisador para gerar o ruído branco sonoro. O alto-falante utilizado é de alta qualidade, com resposta plana para freqüências até 20 kHz da marca Pioneer (modelo tri-axial, TSA 6966).

A figura 46 apresenta a resposta dos microfones.

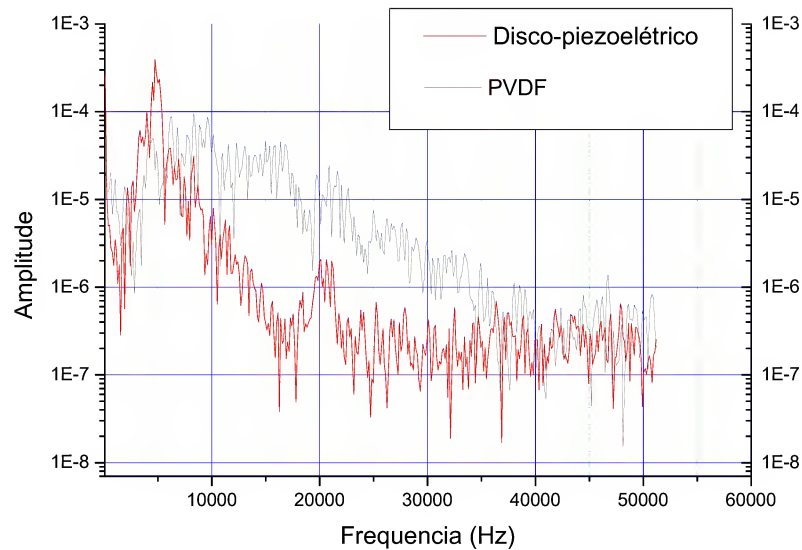



Figura 46 – Resposta do microfones para ruído branco.

Analisando a resposta em freqüência dos microfones, notamos que eles respondem melhor a freqüências entre 3 e 10 kHz. Comparando os microfones, percebemos que o PVDF é mais sensível para freqüências acima de 10kHz e o de disco piezoelétrico apresenta grande ressonância entre 4 e 6kHz.

Como o alto-falante da Pioneer foi projetado para freqüências até 20kHz, este gráfico fica limitado, não revelando se os nossos microfones respondem a freqüências acima de 20 kHz.

No segundo levantamento utilizamos dois transdutores do tipo PVDF, um como alto-falante emitindo o ruído branco e outro "escutando". A figura 47 a seguir apresenta o posicionamento dos transdutores, que ficaram afastados por 5mm e não paralelos evitando a formação de uma caixa de ressonância.

Figura 47– Disposição dos sensores.

Figura 48 – Disposição dos sensores.

Antes de testarmos com o ruído branco, testamos com sinais concentrados em uma única freqüência.Com o analisador de sinais geramos um sinal senoidal de 90 kHz na entrada de um transdutor e analisamos o sinal recebido pelo outro posicionado bem próximo.

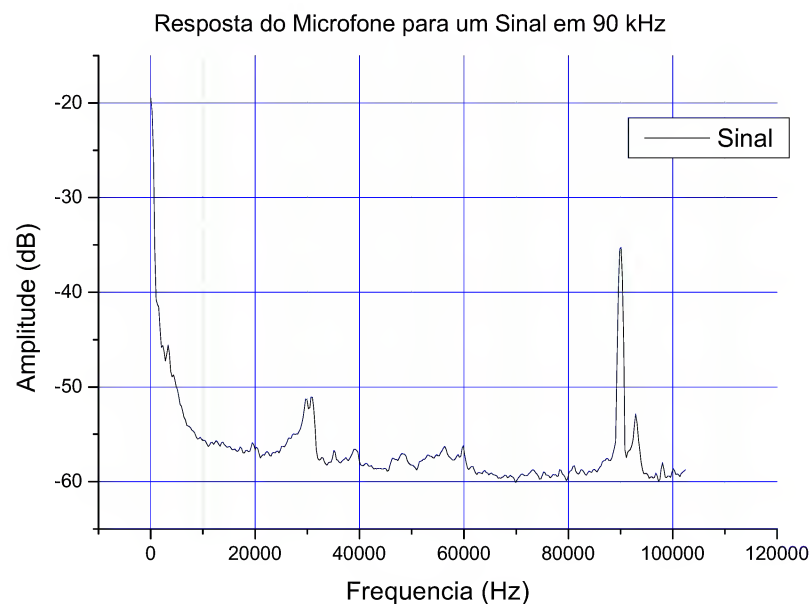



Figura 49 – Resposta em freqüência do microfone PVDF para um sinal de 90kHz.

O pico em 90kHz no gráfico da FFT comprova que nosso transdutor PVDF é capaz tanto de transmitir, quanto de escutar freqüências ultra-sônicas. Porém, ele é muito pouco sensível, é preciso um som com grande potência para detectarmos sinais acima de 20kHz. Os outros picos que aparecem no gráfico são gerados por ruídos ambientes do laboratório. O sensor disco-piezoelétrico não foi capaz de responder a estes níveis de alta frequência.

A próxima etapa foi levantar a resposta para o ruído branco gerado pelo próprio PVDF. No gráfico da figura 50 apresentamos a sua resposta.

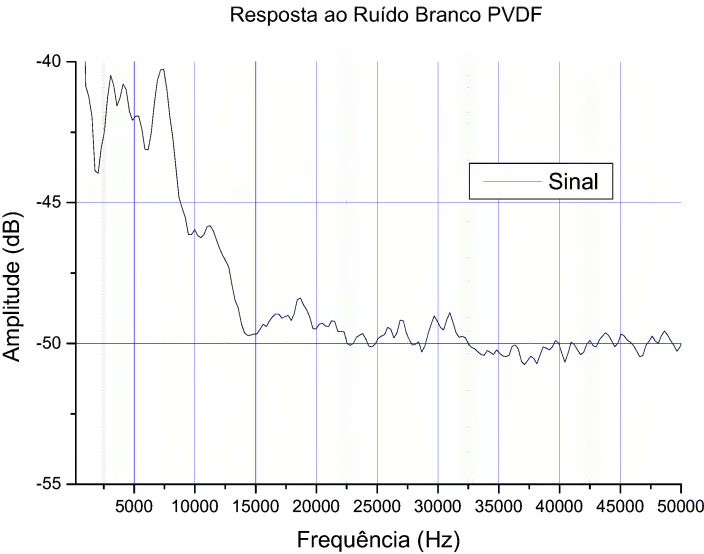



Figura 50 –Resposta ao ruído branco gerado pelo sensor PVDF.

Observando o gráfico notamos que o microfone responde melhor às freqüências abaixo de 20 kHz e apesar da maior atenuação, a resposta é praticamente plana acima de 20kHz.

Outra maneira de levantarmos a curva de resposta do microfone foi feita através de uma tabela freqüência versus amplitude do sinal. Ajustamos o gerador de sinais para uma única freqüência e medimos a amplitude do sinal de saída nesta mesma freqüência. Desta forma, apesar dos erros na leitura do equipamento, concentramos toda a energia da fonte em uma única freqüência e obtemos um sinal relativamente mais forte. Variando a freqüência do sinal de entrada na faixa de zero a 100 kHz, a seguinte tabela foi medida:

Frequência (kHz)	Amplitude (dB)	Frequência (kHz)	Amplitude (dB)
100	-37	10.24	-32.35
90	-36.75	8.96	-31.5
80	-36.85	8.19	-29.15
70	-36.8	6.91	-27.15
60	-36.8	6.144	-30.35
50	-36.75	5.37	-28.3
40	-36.7	4.6	-27.95
30	-36.6	4	-27.5
20	-35.5	3.3	-27.65
18	-35.25	3	-27.55
17.1	-35.65	2.5	-29.9
15.1	-36.2	2	-32.4
12.5	-33.65	1.5	-35.5

Tabela 1 – Resposta em freqüência do microfone.

A tabela gera o seguinte gráfico de resposta do microfone.

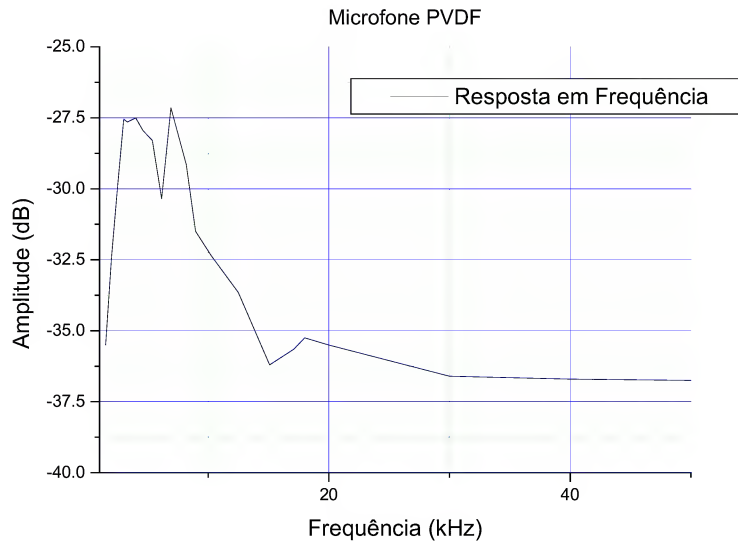



Figura 51 – Gráfico da resposta em freqüência do microfone PVDF.

Conhecendo as respostas em freqüência dos microfones, já podemos interpretar corretamente as suas leituras durante os próximos experimentos.

4.2.5. SINAL DO VAZAMENTO OBTIDO EM LABORATÓRIO

Neste item serão apresentados os resultados dos testes de simulação em laboratório. A sensibilidade dos microfones e seu desempenho sob alta pressão são colocados à prova e os sinais obtidos são avaliados tanto em amplitude como em freqüência. Simulamos vazamentos para furos de diâmetros de 5, 1,5 e 0,8mm. A pressão interna inicial do vaso foi de 1000psi.

Em alguns testes aquisitamos os dados com um osciloscópio digital conectado a um computador e em outros utilizamos a eletrônica padrão de pigs magnéticos, que utilizam a tecnologia PC-104 e têm freqüência de aquisição de 200kHz.

Para condicionarmos melhor o sinal dos microfones e obtermos uma melhor relação sinal-ruído, foi projetado um circuito eletrônico com filtro passa-alta seguido de um amplificador. O filtro elimina os ruídos em baixa freqüência não característicos dos vazamentos, e o amplificador converte o sinal aos níveis de aquisição da placa A/D. A freqüência de corte do filtro é de 200 Hz e o ganho do amplificador é de 25 vezes.

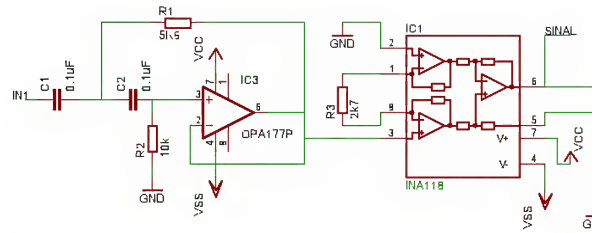



Figura 52 – Circuito condicionador do sinal.

Os gráficos a seguir apresentam os resultados obtidos com o sensor disco-piezoelétrico para cada um dos vazamentos.

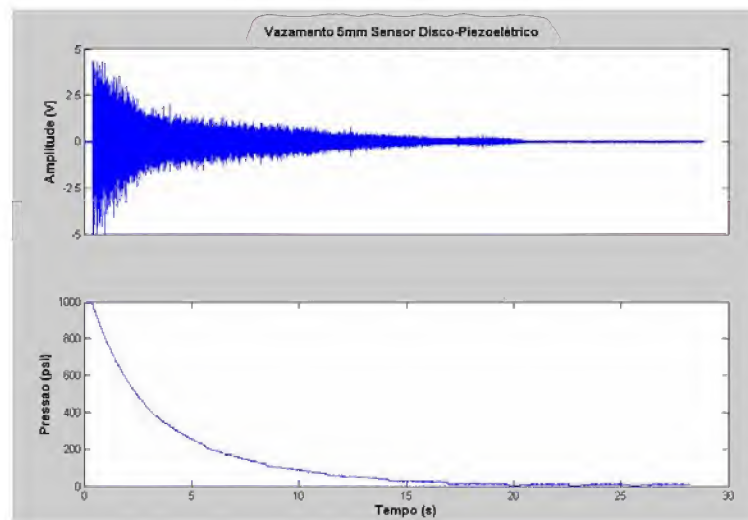



Figura 53 – Vazamento com furo de 5mm.

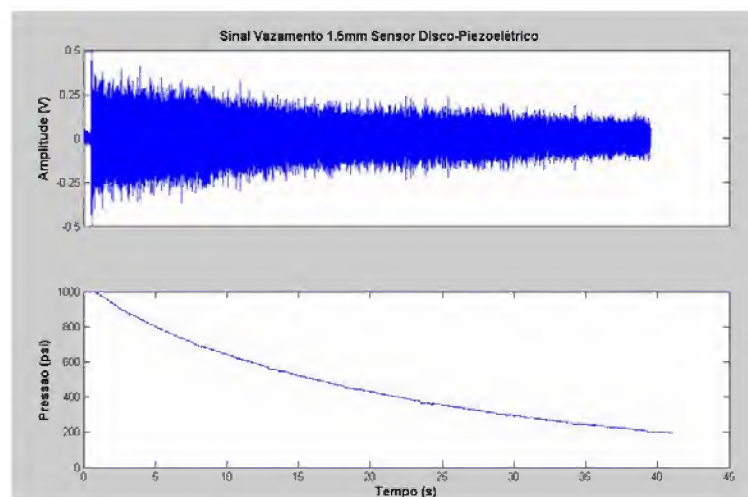



Figura 54– Vazamento com furo de 1.5mm.

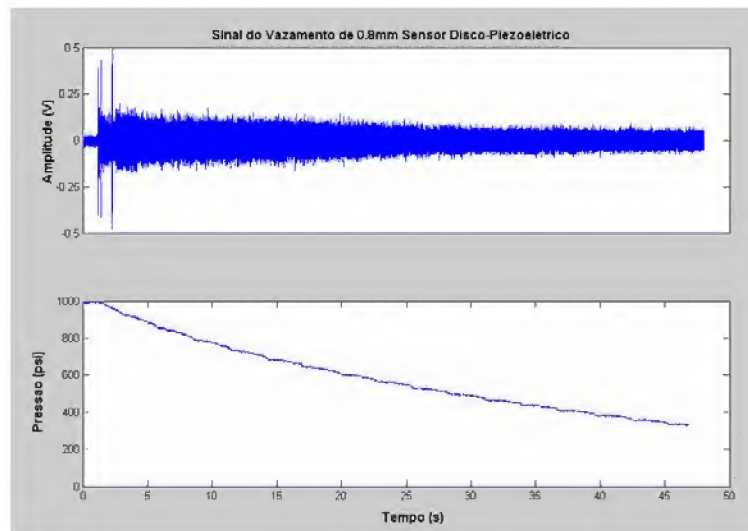



Figura 55 – Vazamento com furo de 0.8mm.

Apesar dos gráficos apresentarem o sinal durante grande parte do tempo de despressurização do vaso, estamos mais interessados na amplitude do sinal quando a pressão interna do vaso é alta, em torno de 1000 psi.

Analisando os gráficos notamos que a amplitude do sinal é diretamente proporcional ao diâmetro do furo e ao diferencial de pressão. Para o furo de 5mm a amplitude do sinal chegou a 9,5 vpp, já para o de 0.8mm chegou a apenas 1,0 vpp.

O gráfico a seguir apresenta uma visualização da variação da relação sinal-ruído com o diâmetro do furo.

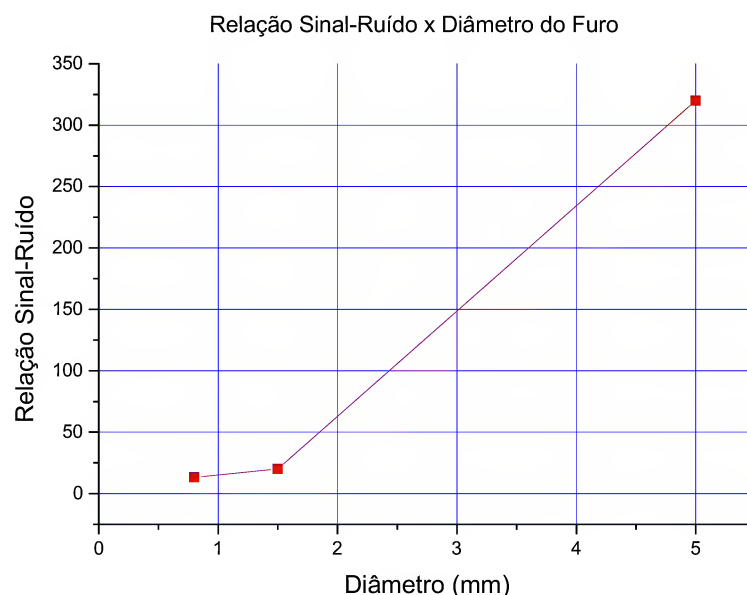



Figura 56– Relação Sinal-Ruído x diâmetro do furo.

Apesar da grande diferença com o vazamento de 5mm, a relação sinal-ruído do furo de 0.8mm é aceitável, o sinal é 13 vezes maior que o ruído, nos permitindo confirmar sua detecção.

O sensor PVDF só apresentou uma boa relação sinal ruído para o furo de 5mm.

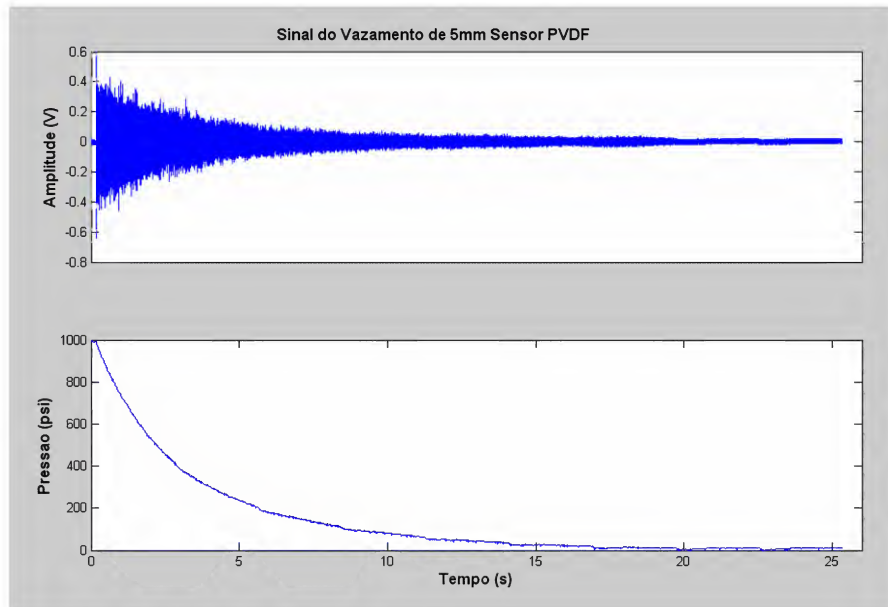



Figura 57– Sinal do Vazamento de 5mm, sensor PVDF.

A amplitude do sinal chegou a 1,0 vpp quando a pressão estava em torno de 1000 psi. O sinal foi 50 vezes maior que o ruído sem vazamento.

A próxima análise dos sinais é no domínio da freqüência. Nosso objetivo é levantar as características em freqüência dos sons dos vazamentos, identificando as freqüências que apresentam maior energia associada.

Para esta análise calculamos a transformada de Fourier (FFT) dos sinais com e sem vazamento para podermos compará-los.

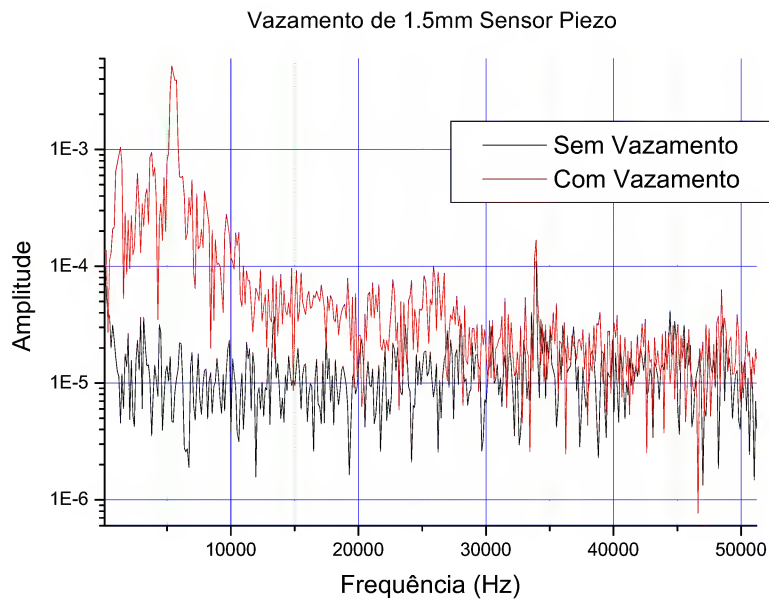



Figura 58 – FFT dos sinais com e sem vazamento sensor Piezo.

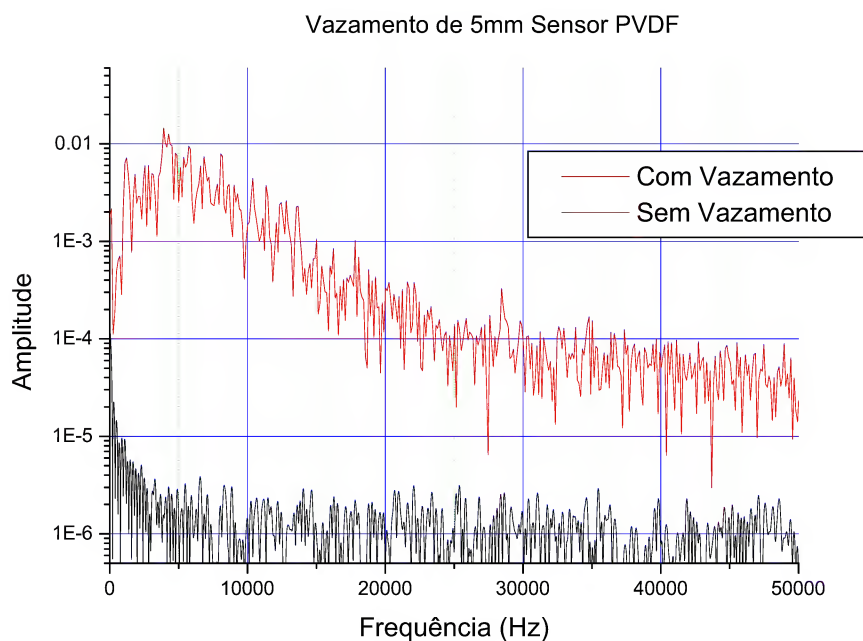



Figura 59– FFT do sinal com e sem vazamento, sensor PVDF.

Na FFT do sinal do sensor disco-piezoelétrico (figura 58), notamos que o som do vazamento gera componentes em diversas freqüências, mas o pico em 5,5kHz se destaca dos demais. Este pico aparece porque, como vimos anteriormente, a resposta do microfone piezoelétrico a esta freqüência é maior que nas outras.

Um comportamento parecido acontece na FFT do sensor PVDF, a energia se espalha entre diversas freqüências se concentrando mais naquelas que o sensor responde melhor. Neste caso nas freqüências abaixo de 20kHz.

A seguir apresentamos uma comparação da resposta dos microfones para o ruído branco e para o vazamento.

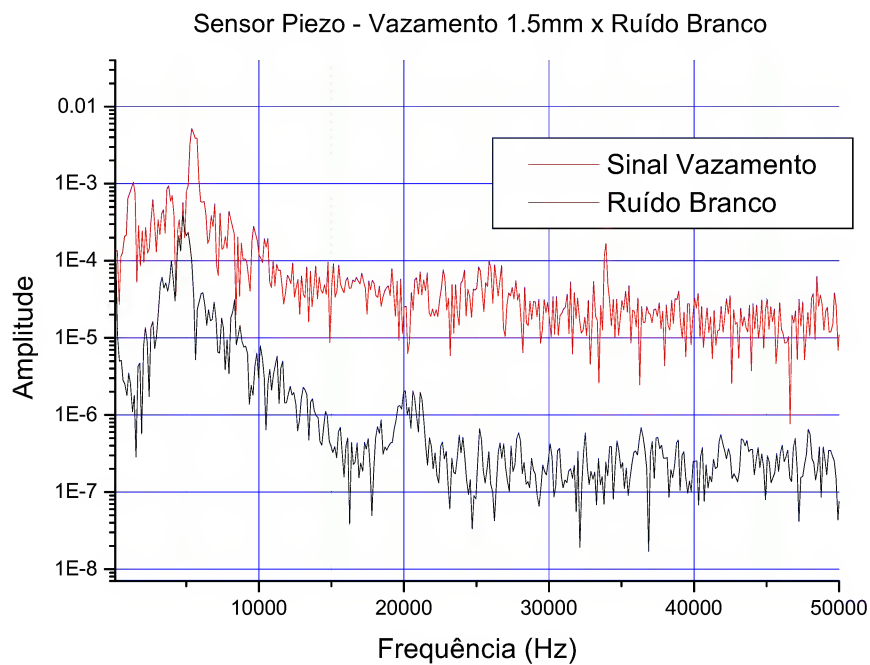



Figura 60 – Comparação do sinal do vazamento com o ruído branco, sensor piezo.

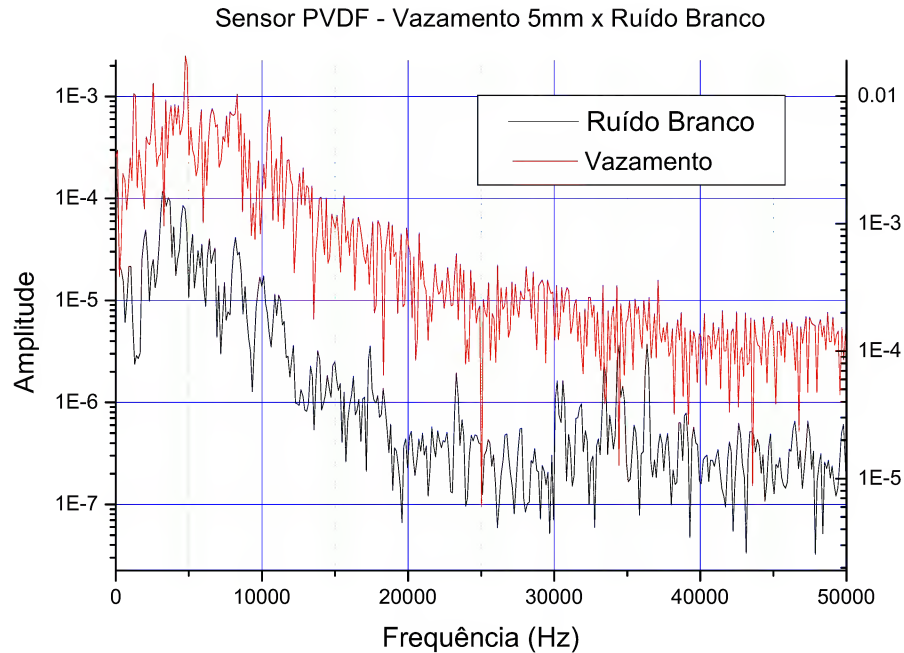



Figura 61 – Comparação do sinal do vazamento com o ruído branco, sensor PVDF.

Observando os gráficos notamos que ambos sinais se concentram nas mesmas faixas e podemos concluir que o ruído do vazamento é branco. Não podemos associar o som do vazamento a um específico valor de freqüência.

Outra ferramenta que apresenta um resultado interessante no domínio da freqüência é o espectrograma do sinal. Esta ferramenta de análise (*specgram*), presente no software Matlab, realiza o cálculo da FFT do sinal a cada intervalo de amostras pré-determinado. O gráfico apresentado é em 3 dimensões, em um eixo temos a freqüência, no outro o tempo, e a cor representa a intensidade da energia em cada freqüência. O padrão de cores é o convencional para gráficos térmicos, quanto mais avermelhada é a cor, maior é a amplitude do sinal. A seguir apresentamos os espectrogramas de cada vazamento.

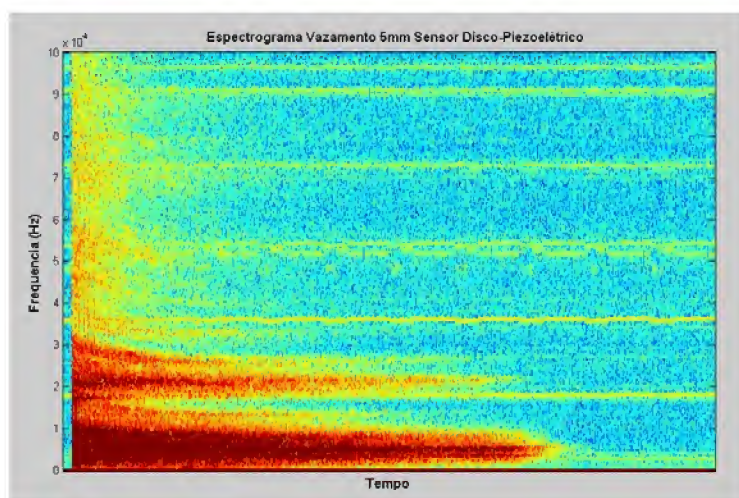



Figura 62 - Espectrograma do vazamento de 5mm.

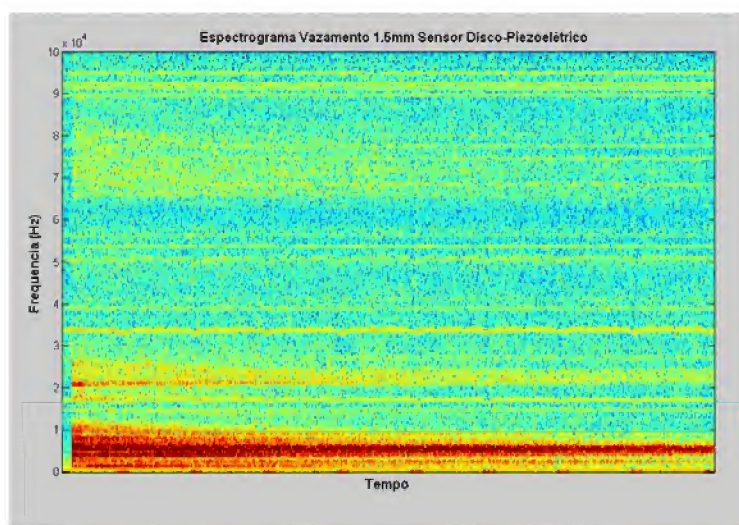



Figura 63 – Espectrograma do Vazamento de 1.5mm

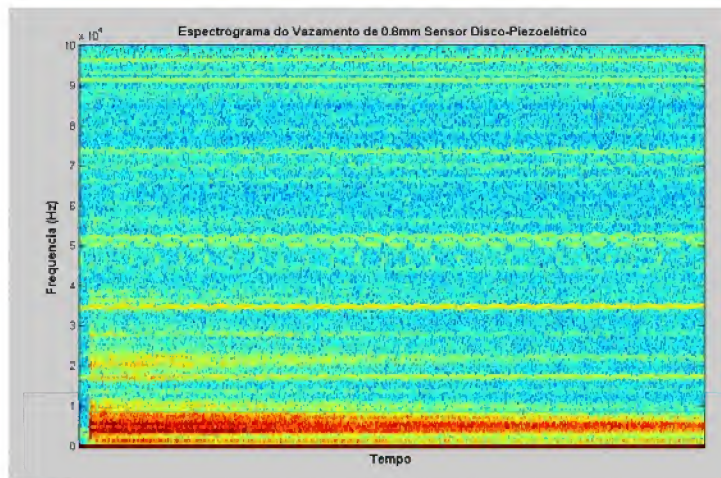



Figura 64 – Espectrograma do Vazamento de 0.8mm.

Nos espectrogramas percebemos que o sinal aquisitado se concentra na faixa de 0 a 10kHz e que sinais com energia acima desta faixa só são detectados no início do vazamento, quando a amplitude do sinal é relativamente maior. Isto acontece devido à resposta do transdutor. Apesar do som do vazamento ser branco, nosso transdutor responde bem melhor às freqüências até 10 kHz. Sinais acima de 10kHz só são detectados quando são apresentam grande energia, caso do início do vazamento, quando a pressão ainda está em torno de 1000psi.

Outra experiência realizada foi a comparação do som do vazamento externo ao vaso com o som interno. Nesta experiência instalamos um sensor PVDF do lado de fora e outro dentro do vaso.

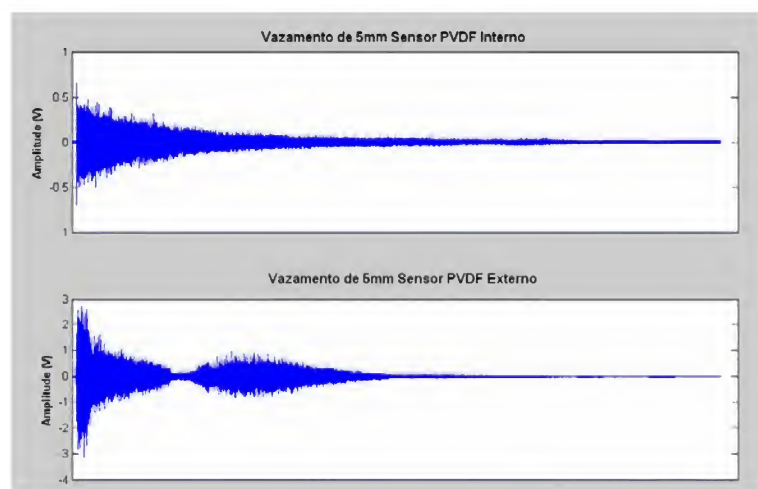



Figura 65– Comparação do som interno com o som externo ao vaso.

A amplitude do som externo é cerca de cinco vezes maior do que o interno e apresenta um comportamento diferente, com uma região de estrangulamento. Esta diferença se dá pelo fato de que o jato de gás está sendo liberado de dentro para fora, o impacto do jato com o ar externo gera sons de maior amplitude.

Não vamos nos concentrar nas causas desta variação de comportamento e sim enfatizar a existência de grande diferença de amplitude entre os sinais.

Durante o processo de pressurização o efeito é revertido, do lado de fora do vaso não temos som, enquanto que dentro os sensores registram grandes sinais. No gráfico a seguir, percebemos que a amplitude do som é proporcional à vazão de gás entrando no vaso.

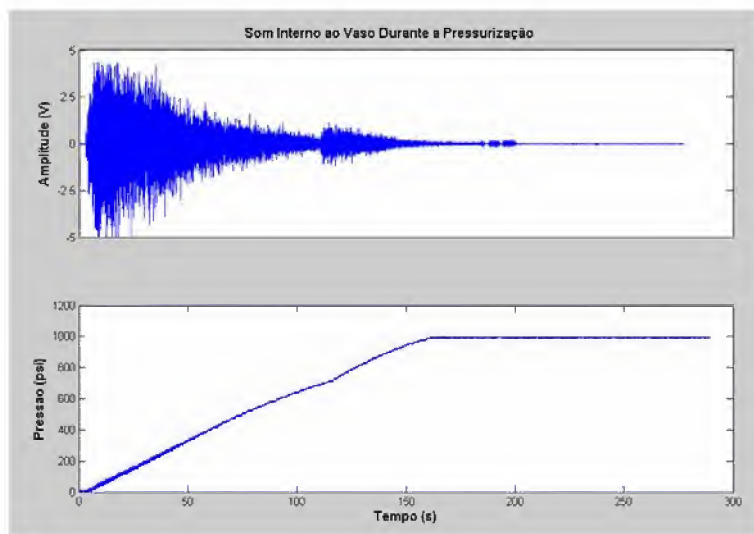



Figura 66– Sinal do som interno do vazamento durante a pressurização do vaso.

No instante t =115s aumentamos a abertura da válvula do cilindro, o que aumentou a velocidade de pressurização, a vazão e a amplitude do som.

Com o sensor PVDF instalado do lado de fora do vaso, simulamos novamente os vazamentos de 5mm e 0.8mm para compararmos seus espectros em freqüência já que o PVDF tem uma resposta melhor em freqüência do que o disco piezoelétrico. A seguir apresentamos os espectrogramas de cada um dos vazamentos.

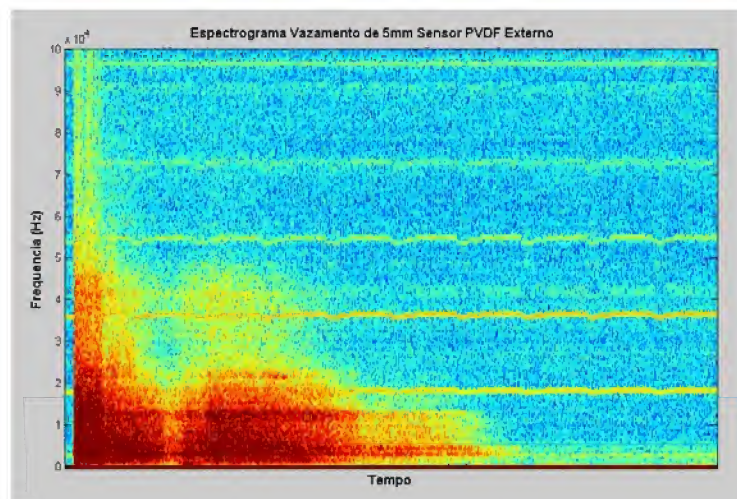



Figura 67 – Espectrograma do Sinal do Som Externo do Vazamento de 5mm.

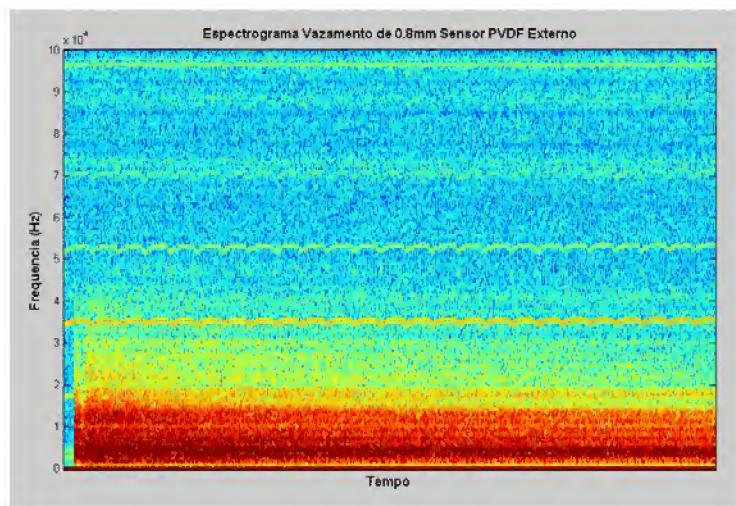



Figura 68 - Espectrograma do Sinal do Som Externo do Vazamento de 0.8mm.

Nos espectrogramas acima, notamos que o sinal se concentra na faixa de 0 a 20kHz e que os sinais acima dessa faixa só têm maior energia para o furo de 5mm, quando chegou até 45 kHz no início do vazamento.

Agora, depois de conhecermos as características acústicas do vazamento, vamos analisar os sons dentro do gasoduto e estudar um método de identificação do vazamento. No próximo sub-capítulo apresentamos a montagem do primeiro protótipo do pig acústico.

4.3. MONTAGEM DO PRIMEIRO PROTÓTIPO

Com os microfones testados e os sons dos vazamentos analisados, o próximo passo é a montagem do primeiro protótipo do pig acústico para detecção de vazamentos em gasodutos. O objetivo da montagem é realizarmos a simulação de vazamentos em um gasoduto real. Com os dados da corrida poderemos levantar as características acústicas internas de um gasoduto em normal operação e verificar se o protótipo é capaz de detectar o vazamento simulado.

O protótipo foi projetado para dutos de Ø16" e é constituído por um pig espuma especial, fabricado com o vaso de pressão já embutido. Esta fabricação foi encomendada à empresa brasileira Hidropig que desenvolve diversos projetos na área de pigs de espuma e copos de poliuretano. O esquema da montagem está apresentado na figura a seguir:

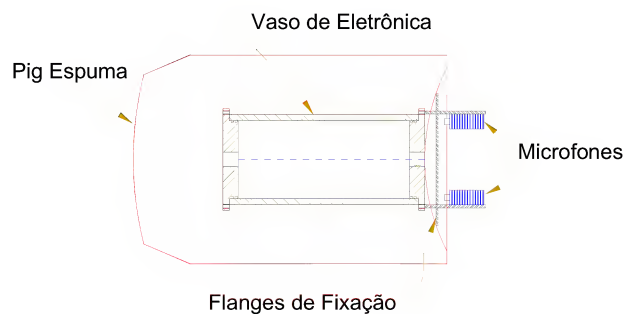



Figura 69– Esquema da montagem do protótipo.

As figuras abaixo apresentam o pig espuma especial sob diversos ângulos. A espuma utilizada foi de um tipo classificada como alta densidade para suportar o vaso de pressão.

Figura 70– Pig espuma especial.

Figuras 71 e 72 - Visões traseira do pig com o vaso embutido.

O material do vaso é o duralumínio, que apesar de ser mais caro que os convencionais de aço, é mais leve e mais indicado para essa aplicação, já que minimiza o desgaste da espuma.

O vaso transporta a eletrônica e a bateria, no seu flange traseiro instalamos os microfones. Este primeiro protótipo será montado com uma eletrônica com alto poder de aquisição para analisarmos o espectro completo em freqüência. A freqüência de aquisição utilizada é de 200 kHz.

Figuras 73 – Vaso, eletrônica e bateria embarcados.

As fotos abaixo apresentam o protótipo completamente montado e pronto para ser lançado. Instalamos os dois tipos de microfones: o de disco piezoelétrico e o de membrana PVDF.

Figuras 74 e 75 – Visões do protótipo do Pig Acústico.

Figura 76 – Protótipo do Pig Acústico.

4.4. TESTE DE CAMPO

O teste de campo foi realizado no gasoduto GASBEL no trecho Barbacena – Belo Horizonte com apoio da equipe técnica da Transpetro do DTSE. O diâmetro do duto é de 16” e a pressão interna de operação varia entre 50 e 60 kgf/cm^2.

Figura 77– Pig Acústico no lançador.

O trecho possui pontos de monitoração onde estão instalados drenos com válvulas de abertura rápida. Os vazamentos foram simulados pela abertura destas válvulas. Os tubos dos drenos possuem diâmetro interno de 20,7mm.

Figura 78 – Dreno utilizado para simulação do vazamento.

Por motivos de segurança, combinamos de só abrir a válvula quando o pig passasse por ela. A equipe responsável pela abertura da válvula ficou à espera da passagem do pig e utilizando geofones, monitoravam a sua aproximação.

Figura 79– Equipe monitorando a passagem do pig com o geofone.

4.4.1.
RESULTADOS

Com o auxílio do geofone podíamos escutar o som do pig passando pelas soldas do duto. Estimamos a velocidade do pig medindo o intervalo de

tempo entre as soldas. Sabendo que a distância entre as soldas é de 12m e o intervalo de tempo medido foi de 3 segundos, a velocidade estimada é de 4m/s.

Assim que o pig passou, a válvula foi aberta e mantida nesta condição durante 45 segundos. A hora do momento da abertura da válvula foi anotada para posterior análise do sinal.

Após 16 horas de corrida, percorrendo 180km de gasoduto, o pig chegou na estação da Transpetro de Belo Horizonte fragmentado em duas partes, uma menor composta pelo nariz do pig e a outra contendo a eletrônica e os sensores.

Figura 80– Recebedor de pigs do GASBEL.

Figura 81 – Pig fragmentado em duas partes.

Figuras 82 e 83 – Parte traseira do pig, com os sensores e a eletrônica embarcada.

Como podemos ver nas fotos acima, o flange traseiro para fixação dos microfones foi bem danificado durante a corrida. Estes danos podem ter sido provocados pela passagem do pig por curvas em alta velocidade, ou até por alguma restrição não nominal da linha como válvulas semi-abertas ou amassamentos.

Apesar de ter sofrido grandes impactos, a eletrônica embarcada não sofreu danos e operou normalmente.

Os gráficos a seguir apresentam os dados obtidos:

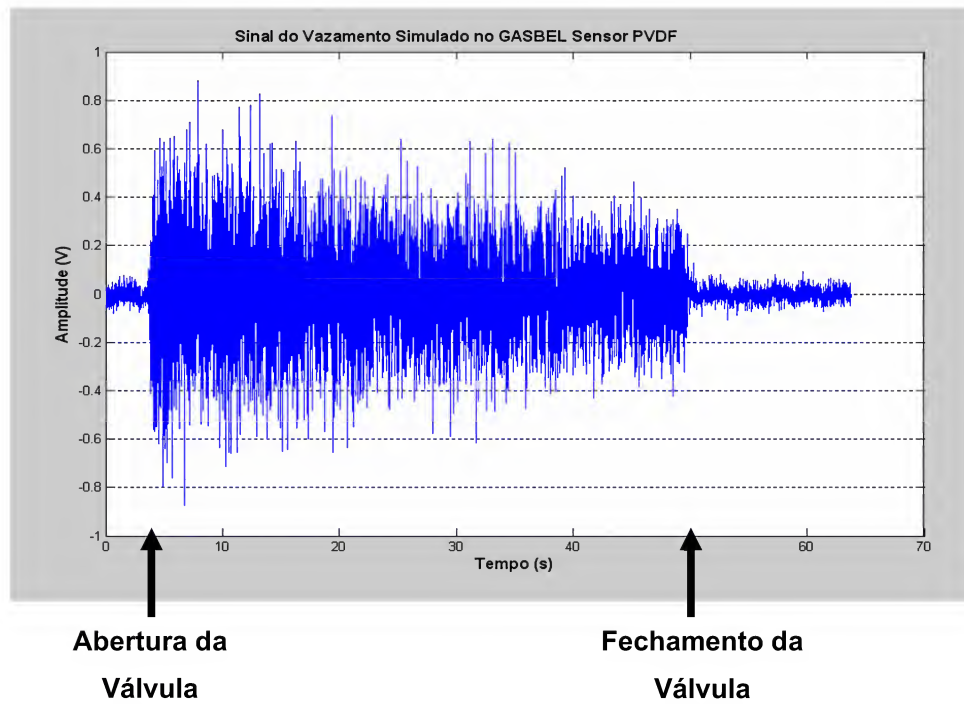



Figura 84 – Sinal do Vazamento Simulado no Gasbel Sensor PVDF

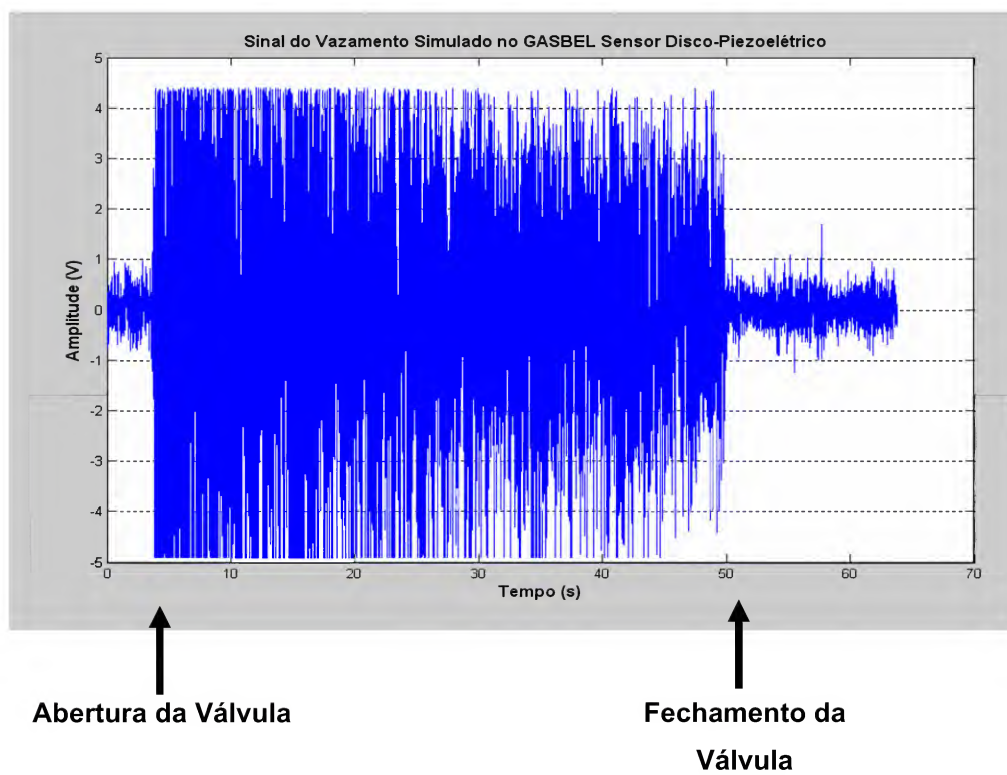



Figura 85 – Sinal do Vazamento Simulado no Gasbel Sensor Disco-piezoelétrico

O vazamento simulado foi detectado com sucesso. O som propagado no gás foi detectado pelos dois sensores e a relação sinal-ruído foi muito boa.

Nos gráficos das figuras 84 e 85, a primeira seta indica o momento em que a válvula foi aberta e a segunda em que foi fechada. A mudança de amplitude é muito visível, o sinal é 10 vezes maior que o ruído normal do gasoduto.

No gráfico da figura 84, do sensor PVDF, podemos notar uma queda gradativa da amplitude do sinal conforme o pig vai se distanciando da válvula. Considerando a velocidade de 4m/s, o pig percorreu 180m durante os 45 segundos de vazamento. Já o sensor disco piezoelétrico, por ser mais sensível, chegou a gerar um sinal da ordem de 400 mV volts pico a pico que sendo amplificado 25 vezes, saturou o limite de entrada da placa conversora A/D. Esta saturação limita a amplitude do sinal a níveis menores que 4,8 Volts causando o efeito de corte do sinal.

Além da análise em amplitude realizamos a análise em freqüência do sinal detectado.

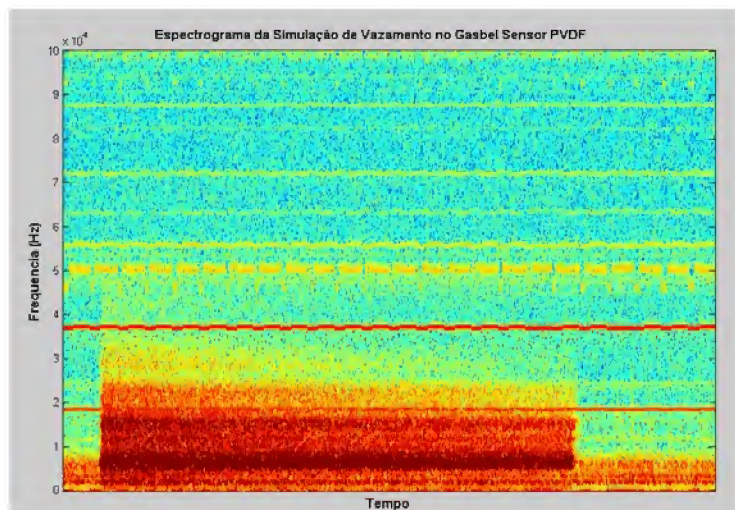



Figura 86– Espectrograma do Sinal do Vazamento Simulado no Gasbel.

Podemos notar no espectrograma que o sinal do gasoduto sem vazamento, tem sua energia concentrada na faixa abaixo de 10kHz. Já durante o vazamento, além do sinal aumentar de intensidade dentro desta faixa, os sinais na faixa entre 10kHz e 20kHz aumentam visivelmente de intensidade.

Também observamos que certas freqüências, como 19 e 38 kHz, apresentam grande amplitude o tempo todo. Estes sinais têm origem eletrônica e

não têm relação com a física do vazamento. Eles são provocados por alguma interferência do funcionamento da eletrônica na aquisição de dados.

Uma análise em freqüência mais detalhada é apresentada nos gráficos a seguir.

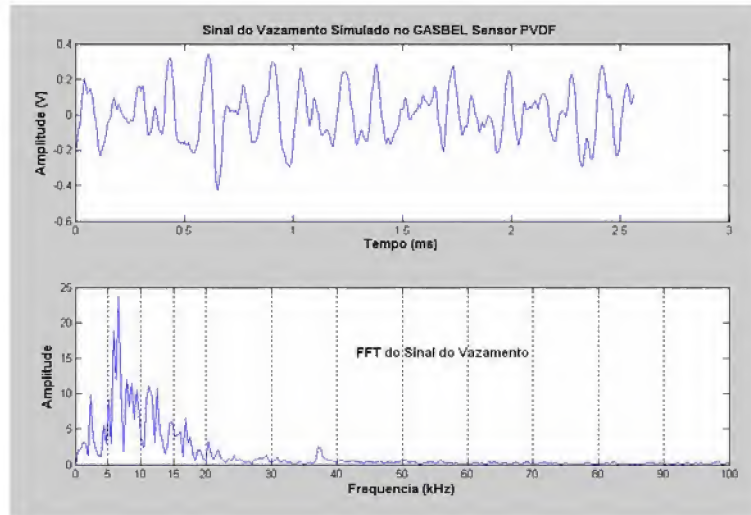



Figura 87 - FFT do Sinal do Vazamento Simulado no GASBEL

A FFT do sinal aquisitado se concentra na faixa abaixo de 20 kHz com maior pico em torno de 5kHz. Esta resposta em freqüência, como mostramos anteriormente é característica de um ruído branco. A seguir recuperamos o espectro em freqüência do sinal original do vazamento utilizando a resposta natural do sensor PVDF.

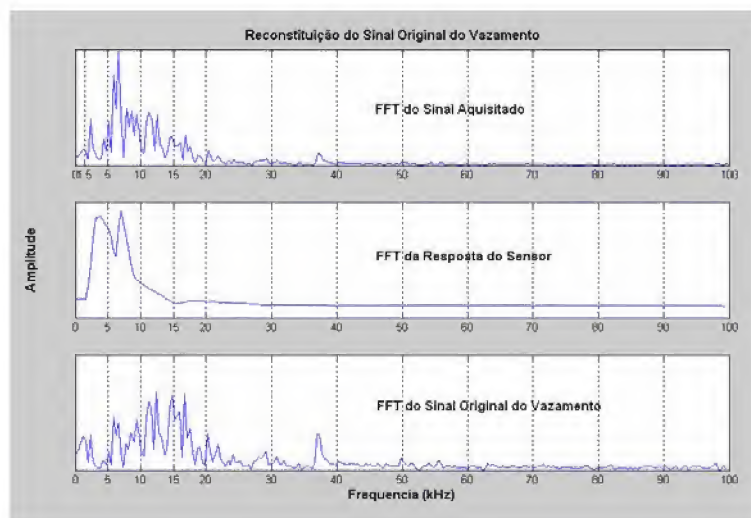



Figura 88 – Reconstituição do Sinal Original do Vazamento.

Como notamos no gráfico, o sinal original do vazamento apresenta maior amplitude na faixa de freqüência abaixo de 20 kHz, com picos em torno dos 13kHz.

Considerando a velocidade do pig em 4m/s, podemos calcular a atenuação do som propagado no gás. Em 180 metros a amplitude do sinal do sensor PVDF diminui em 1 volt, o que nos dá uma atenuação -1,93 dB por metro.

Apesar do estado em que o pig chegou, o objetivo do teste de campo foi alcançado, obtivemos dados de um vazamento em um gasoduto real em operação assim como os seus sons padrões.

Em alguns momentos da corrida, percebemos mudanças na amplitude do sinal sem que houvesse vazamento. Os gráficos a seguir apresentam uma dessas variações.

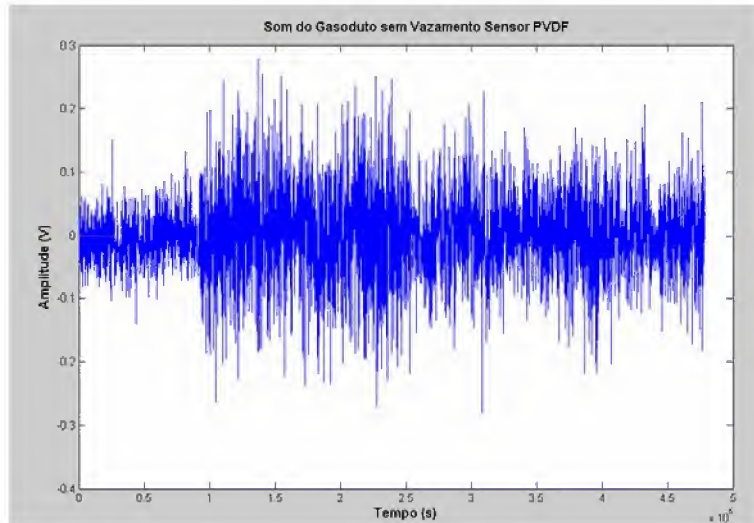



Figura 89 – Sinal do gasoduto sem vazamento.

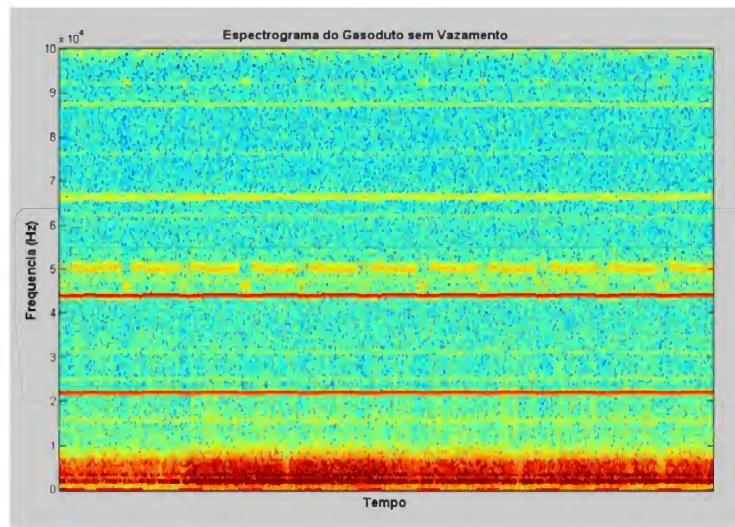



Figura 90 – Espectrograma do som do gasoduto sem vazamento.

As variações de amplitude foram de baixa intensidade e não geraram freqüências acima de 10kHz. A definição de uma assinatura do sinal do vazamento é importante para que estes sinais não sejam interpretados equivocadamente.

A assinatura do vazamento se caracteriza por um repentino aumento de amplitude, gerando sinais acima de 10kHz que vai lentamente perdendo energia de forma linear com o deslocamento do pig.